

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2001-7447  
(P2001-7447A)

(43) 公開日 平成13年1月12日 (2001.1.12)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームト* (参考)
H 0 1 S 5/343		H 0 1 S 3/18	6 7 7 5 F 0 4 1
// H 0 1 L 33/00		H 0 1 L 33/00	C 5 F 0 7 3

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願平11-172840

(22) 出願日 平成11年6月18日 (1999.6.18)

(71) 出願人 000226057

日亜化学工業株式会社

徳島県阿南市上中町岡491番地100

(72) 発明者 長濱 慎一

徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化学工業株式会社内

Fターム(参考) 5F041 CA05 CA34 CA40 CA58

5F073 AA73 AA74 CA02 CA07 EA07

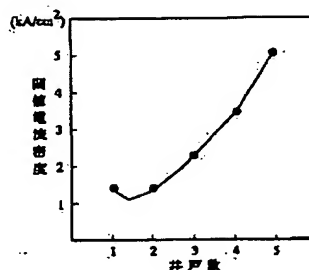
(54) 【発明の名称】 窒化物半導体レーザ素子

(57) 【要約】

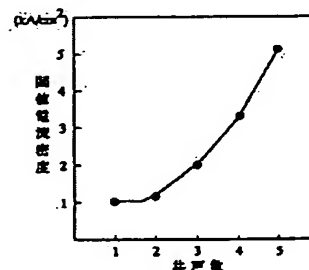
【課題】 高信頼性を有する発振波長が420nm以上のレーザ素子を得るため、しきい値電流密度を低下させ、寿命特性の向上が可能な窒化物半導体レーザ素子を提供することである。

【解決手段】 基板上に、少なくともn型窒化物半導体、Inを含んでなる井戸層を有する量子井戸構造の活性層、及びp型窒化物半導体を順に積層してなる窒化物半導体レーザ素子において、該活性層が、井戸層の全積層数が2以下である量子井戸構造であり、更に、発振波長が420nm以上である。

(a)



(b)



BEST AVAILABLE COPY

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に、少なくともn型窒化物半導体、Inを含んでなる井戸層を有する量子井戸構造の活性層、及びp型窒化物半導体を順に積層してなる窒化物半導体レーザ素子において、該活性層が、井戸層の全積層数が2以下である量子井戸構造であり、更に、発振波長が420nm以上であることを特徴とする窒化物半導体レーザ素子。

【請求項2】 前記活性層が、井戸層の全積層数が1である単一量子井戸構造であり、更に、発振波長が430nm以上であることを特徴とする請求項1に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項3】 前記活性層の量子井戸構造が、井戸層と障壁層とから形成され、該障壁層が、n型不純物濃度を $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 以下含んでなることを特徴とする請求項1又は2に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項4】 前記障壁層が、n型不純物を $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以下含んでなることを特徴とする請求項3に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項5】 前記井戸層が、n型不純物を $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以下含んでなることを特徴とする請求項1～4のいずれか1項に記載の窒化物半導体素子。

【請求項6】 前記井戸層が、膜厚400Å以下であることを特徴とする請求項1～5のいずれか1項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項7】 前記井戸層が、膜厚300Å以下であることを特徴とする請求項1～6に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項8】 前記活性層の量子井戸構造が、井戸層と障壁層とから形成され、該障壁層が、100Å以上の膜厚であることを特徴とする請求項1～7に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項9】 前記障壁層が、100～200Åの膜厚であることを特徴とする請求項8に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項10】 前記窒化物半導体レーザ素子が、窒化物半導体と異なる材料よりなる異種基板又は窒化物半導体基板上に、窒化物半導体の横方向の成長を利用して成長させてなる窒化物半導体上に成長されてなることを特徴とする請求項1～9のいずれか1項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、発光ダイオード、レーザダイオード等の発光素子、又は太陽電池、光センサー等の受光素子に使用される窒化物半導体(In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>1-y</sub>N, 0 ≤ x, 0 ≤ y, x+y ≤ 1)よりなる窒化物半導体レーザ素子に関し、特にしきい値電流密度が低く、寿命特性が向上する発振波長420nm以上の窒化物半導体レーザ素子に関する。

## 【0002】

【従来の技術】近年、窒化物半導体からなるレーザ素子は、波長400nm付近の青色レーザ素子として実用可能なレベルまで研究が進んでいる。例えば、本発明者を含む研究者等は、Japanese Journal of Applied Physics, Vol.37(1998)pp.L1020-L1022に、ELOG (Epitaxially laterally overgrown GaN)を基板とし、この基板上に素子構造を形成し、約400nmの波長の光を、50℃の環境温度の条件下、5mWの出力で約160時間連続発振させることが可能な窒化物半導体レーザ素子を発表している。

【0003】また、本発明者は、レーザディスプレイやカラーコピー等への用途のある発振波長が420nm以上のレーザ素子の研究を行っている。発振波長が420nm以上のレーザ光を得るためには、活性層であるInGa<sub>1-x</sub>N層の井戸層のIn組成比を上げ、バンドギャップエネルギーを小さくする必要がある。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、一般的に、InGa<sub>1-x</sub>NのIn組成比を大きくすると、その結晶性が劣化し、レーザ素子においては自己吸収の割合が大きくなり、且つ量子効率も低下するため、しきい値電流密度が大きくなり、高信頼性を有するレーザ素子ができなかった。

【0005】そこで、本発明の目的は、高信頼性を有する発振波長が420nm以上のレーザ素子を得るため、しきい値電流密度を低下させ、寿命特性の向上が可能な窒化物半導体レーザ素子を提供することである。

## 【0006】

【課題を解決するための手段】即ち、本発明は、下記(1)～(8)の構成により、本発明の目的を達成することができる。

(1) 基板上に、少なくともn型窒化物半導体、Inを含んでなる井戸層を有する量子井戸構造の活性層、及びp型窒化物半導体を順に積層してなる窒化物半導体レーザ素子において、該活性層が、井戸層の全積層数が2以下である量子井戸構造であり、更に、発振波長が420nm以上であることを特徴とする窒化物半導体レーザ素子。

(2) 前記活性層が、井戸層の全積層数が1である単一量子井戸構造であり、更に、発振波長が430nm以上であることを特徴とする前記(1)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(3) 前記活性層の量子井戸構造が、井戸層と障壁層とから形成され、該障壁層が、n型不純物濃度を $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 以下含んでなることを特徴とする前記(1)又は(2)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(4) 前記障壁層が、n型不純物を $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以下含んでなることを特徴とする前記(3)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(5) 前記井戸層が、n型不純物を $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以下含んでなることを特徴とする前記(4)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(6) 前記井戸層が、膜厚400Å以下であることを特徴とする前記(5)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(7) 前記井戸層が、膜厚300Å以下であることを特徴とする前記(6)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(8) 前記活性層の量子井戸構造が、井戸層と障壁層とから形成され、該障壁層が、100Å以上の膜厚であることを特徴とする前記(1)～(7)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(9) 前記障壁層が、100～200Åの膜厚であることを特徴とする前記(8)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(10) 前記窒化物半導体レーザ素子が、窒化物半導体と異なる材料よりなる異種基板又は窒化物半導体基板上に、窒化物半導体の横方向の成長を利用して成長させてなる窒化物半導体上に成長されてなることを特徴とする前記(1)～(9)のいずれか1項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(5) 前記井戸層が、 $n$ 型不純物を $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以下含んでなることを特徴とする前記(1)～(4)のいずれか1項に記載の窒化物半導体素子。

(6) 前記井戸層が、膜厚40オングストローム以下であることを特徴とする前記(1)～(5)のいずれか1項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(7) 前記井戸層が、膜厚30オングストローム以下であることを特徴とする前記(1)～(6)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(8) 前記活性層の量子井戸構造が、井戸層と障壁層から形成され、該障壁層が、100オングストローム以上の膜厚であることを特徴とする前記(1)～(7)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(9) 前記障壁層が、100～200オングストロームの膜厚であることを特徴とする前記(8)に記載の窒化物半導体レーザ素子。

(10) 前記窒化物半導体レーザ素子が、窒化物半導体と異なる材料よりなる異種基板又は窒化物半導体基板上に、窒化物半導体の横方向の成長を利用して成長させてなる窒化物半導体上に成長されてなることを特徴とする前記(1)～(9)のいずれか1項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【0007】つまり、本発明は、発振波長が420nm以上となるように井戸層のIn組成比が調整された量子井戸構造を有する活性層を、井戸層の全積層数を2以下として形成することにより、低しきい値電流密度で長時間の連続発振が可能な窒化物半導体レーザ素子を提供することができる。

【0008】前記のJ. J. A. P. に記載の技術では、井戸層の積層数を2とするとしきい値電流密度が最も低下することが記載されているが、井戸層の積層数を1とするとしきい値電流密度が急激に増加していることが示されており、発振波長が400nm付近の場合では、井戸層の積層数を減らすことでは利得が得られ難いことが示唆されている。図3に、発振波長が400nm付近のレーザ素子におけるしきい値電流密度と井戸層の積層数の関係を示すグラフを示す。

【0009】これに対して、本発明は、上記の如く、結晶性の低下が予想される高In組成比であって、且つキャリアの閉じ込めをする井戸層の積層数を減らしたにもかかわらず、しきい値電流密度を低下させ、良好な寿命特性を達成させることができる。このように井戸層の積層数を減らしても大きな利得が得られる理由は、恐らく、発振波長が420nm以上となるようにIn組成比を高くすると、発振波長が約400nmとなるIn組成比の場合には得られない、良好なキャリアの閉じ込めが可能となるためではないかと考えられる。つまり、In組成比が大きいと、InGaInの組成分離によるIn組成不均一が大きくなり、深い局在準位が形成され、それが量子ドットの効果を得るために大きな利得が得られ易

くなると思われる。また、活性層内の損失については、一般的にIn組成比を大きくすれば結晶性が低下するために、自己吸収の割合が大きくなり内部損失が増加すると考えられるが、本発明は上記の如く、結晶性が低下し易い井戸層の全積層数を2以下としているので、自己吸収の割合を減らして内部損失を小さくしている。

【0010】以上のように、本発明者は、しきい値電流密度を低減するために、利得の増加と損失の低減について種々検討した結果、In組成比の程度、特に420nm以上となるようなIn組成比と、420nmより短波長の場合のIn組成比とは、In組成不均一の程度に大きな違いが生じることを見出した。そして、理論による推考と実験を重ねることで、発振波長が420nm以上となる高In組成比では井戸層の全積層数を2以下としても大きな利得が得られ、しかも井戸層の積層数の減少で内部損失が低減され、その結果、しきい値電流密度の低下を達成している。また更に、本発明は、しきい値電流密度の低下に対して、予想以上に寿命特性が向上しており、恐らく大きなIn組成不均一が素子の劣化の防止に何らかの好影響を与えているのではないかと予想される。

【0011】ちなみに、400nm付近の発振が可能な程度のIn組成比の場合は、420nm以上の発振が可能な場合と同様に、In組成不均一が生じているが、In組成不均一の程度が小さく、この小さなIn組成不均一により形成される局在準位による量子ドットの効果は小さいため、420nm以上としたとき得られる大きな利得が、400nm付近では得られないと推測される。

【0012】更に、本発明において、レーザ素子の発振波長を430nm以上とし、活性層が井戸層の全積層数が1である単一量子井戸構造であると、しきい値電流密度の低下、および素子の寿命特性の向上の点で好ましい。更に、本発明において、活性層の量子井戸構造を形成する障壁層が、 $n$ 型不純物を $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以下、好ましくは $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 以下含んでなると、しきい値電流密度を低下させ、寿命特性を向上させる点で好ましい。また更に、本発明において、井戸層が、 $n$ 型不純物を $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以下含んでなると、しきい値電流密度を低下させ、寿命特性を向上させる点で好ましい。また更に、本発明において、井戸層が、膜厚40オングストローム以下、好ましくは、膜厚が30オングストローム以下であると、InGaInの結晶性を損なうことなく、しきい値電流密度を低下させ、寿命特性を向上させる点で好ましい。また更に、本発明において、活性層の量子井戸構造が、井戸層と障壁層から形成され、該障壁層が、100オングストローム以上、好ましくは100～200オングストロームの膜厚であると、寿命特性の向上の点で好ましい。

【0013】また更に、本発明において、窒化物半導体レーザ素子が、窒化物半導体と異なる材料よりなる異種

基板又は窒化物半導体基板上に、窒化物半導体の横方向の成長を利用して成長させる窒化物半導体（以下ELOG成長によるELOG基板、又は単にELOG基板とする）上に成長されてなると、転位の低減された窒化物半導体を基板とするので、転位の少ない量子構造を形成することができ、特にIn組成比の大きな井戸層の結晶性を良好にすることができ、しきい値電流密度の低減及び寿命特性の向上の点で好ましい。

【0014】また、以下に、本発明の好ましいその他の形態について記載する。本発明において、ELOG基板が用いられ、ELOG基板上に成長させるn型コンタクト層が、 $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x < 1$ 、好ましくは $0.01 \leq x \leq 0.05$ ) からなると、n型コンタクト層と熱膨張係数が異なる傾向があるELOG基板上に、n型コンタクト層を形成しても内部の微細なクラックの発生が防止でき、しきい値電流密度の低下及び寿命特性の向上の点で好ましい。n型コンタクト層上には、レーザ素子の種々の機能を有する複数の層を成長させるため、n型コンタクト層の結晶性が良好であればあるほど、結晶性の良好な素子を作製することができ、素子特性の向上を達成することができる。また、本発明において、ELOG基板を成長させるための、異種基板が、サファイアのC面がステップ状にオフアングルされているものと、転位の低減及び良好な面状態を得る点で好ましく、このようなELOG基板上に成長される量子構造も良好となり、本発明の効果を得る点で好ましい。更に、ステップ状にオフアングルされているサファイア基板のオフアングル角が、 $0.1^\circ \sim 0.3^\circ$  であるとELOG基板を良好に成長させることができ、しきい値電流密度の低下及び寿命特性の向上の点で好ましい。

#### 【0015】

【発明の実施の形態】以下に、本発明の窒化物半導体レーザ素子について更に詳細に説明する。本発明の窒化物半導体レーザ素子は、基板上に、少なくともn型窒化物半導体、Inを含んでなる井戸層を有する量子井戸構造の活性層、及びp型窒化物半導体を順に積層されてなる素子であって、活性層が井戸層の全積層数を2以下として形成され、更に、発振波長が420nm以上となるように井戸層のIn組成比が調整されてなる。以下に素子構造を形成する。

【0016】（活性層）本発明において、活性層としては、少なくとも井戸層にInを含んでなる $In_xGa_{1-x}N$  ( $0 \leq x < 1$ ) からなる量子井戸構造である。そして、量子井戸構造の活性層は、発振波長が420nm以上となるようにIn組成比が調整されている。活性層のIn組成比の調整としては、井戸層のIn組成比を、発振波長が420nm以上となるように調整する。井戸層のIn組成比としては、発振波長が420nm以上となるIn組成比であれば特に限定されず、具体的な値としては、例えば下記の理論値の計算式から求められる値を

近似的な値として挙げるることができる。しかし、実際にレーザ素子を動作させて得られる発振波長は、量子井戸構造をとる量子単位が形成されるため、発振波長のエネルギー（E $\lambda$ ）がInGa $\lambda$ Nのバンドギャップエネルギー（E $g$ ）よりも図2のように大きくなり、計算式などから求められる発振波長より、短波長側へシフトする傾向がある。

【0017】【理論値の計算式】

$$E_g = (1-x)3.40 + 1.95x - Bx(1-x)$$

$$\text{波長 (nm)} = 1240/E_g$$

E $g$ : InGa $\lambda$ N井戸層のバンドギャップエネルギー

x: Inの組成比

3.40 (eV): Ga $\lambda$ Nのバンドギャップエネルギー

1.95 (eV): InNのバンドギャップエネルギー

B: ボーイングパラメータを示し、1~6 eVとする。

このようにボーイングパラメータが変動するのは、最近の研究では、SIMS分析などから、従来は結晶に歪みがないと仮定して1 eVとされていたが、In組成比の割合や膜厚が薄い場合等により歪みの生じる程度が異なり、1 eV以上となることが明らかとなってきたためである。

【0018】上記のように井戸層のSIMS分析などから求められる具体的なIn組成比から考えられる発振波長と、実際に発振させたときの発振波長とは、やや相違があるものの、実際の発振波長が420nm以上となる場合に、活性層の井戸層の全積層数を2以下とすると、しきい値電流密度の低下と寿命特性の向上が可能となり、高信頼性の得られるレーザ素子を提供することができる。この理由は定かではないが、恐らく、発振波長が400nm付近の場合には得られなかったが、発振波長が420nmとなる素子の場合、In組成不均一が大きくなり深い局在単位が形成されそれが量子ドットの効果を得るために、井戸層の全積層数が2以下であっても大きな利得が得られ、その結果、しきい値電流密度の低下が可能となると考えられる。更に、井戸層の積層数を2以下にすると、障壁層の膜厚を100オングストローム以上、好ましくは100~200オングストロームと、厚めにした方が寿命が長くなる傾向がある。このことから、しきい値電流密度の低下と寿命特性の向上が可能となる。更に、しきい値電流密度の低下の程度より良好な寿命特性が得られることから、大きなIn組成不均一が素子劣化の防止に何らかの好影響を与えているためではないかと考えられる。

【0019】活性層の量子井戸構造を形成する井戸層の全積層数は、発振波長が420nm以上では2又は1であり、より好ましくは発振波長が430nm以上では1である。このように発振波長によるIn組成比の変化と、井戸層の積層数の調整とにより、しきい値電流密度を良好に低下させ得ることができる。図1(a)に発振

波長が420nmの場合の井戸層の積層数としきい値電流密度の関係を示し、図1(b)に発振波長が430nmの場合についてグラフを示す。まず図1(a)に示すように、発振波長が420nmの場合は、井戸層の積層数が1と2が最もしきい値電流密度が低下し、井戸層の積層数を3及び4とすると急激に上昇する傾向がある。また、図1(b)に示すように、発振波長が430nmでは、井戸層の積層数が1の場合が最もしきい値電流密度が低下し、井戸層の積層数を2、3などと増やすとしきい値電流密度の上昇が見られる。また、430nmより長波長の場合も430nmの場合と同様に井戸層の積層数が1の場合、しきい値電流密度が最小値となる。

【0020】本発明において、井戸層は、アンドープでも、不純物をドーピングされていてもよいが、好ましくは結晶性を損なわない点で、アンドープ、または不純物をドーピングする場合でも不純物(例えばSiなど)を $1 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ 以下含有されてなるものが好ましい。井戸層の結晶性が良好であれば、しきい値電流密度の低下や寿命特性の向上の点で好ましい。井戸層の膜厚は、特に限定されないが、しきい値電流密度の低下の点で、400Å以下である。好ましくは300Å以下である。また井戸層の膜厚の下限値は、特に限定されないが、100Å程度である。

【0021】また、活性層の量子井戸を形成する障壁層としては、特に限定されないが、少なくとも井戸層よりバンドギャップエネルギーが大きい組成のものが挙げられ、例えば具体的には、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 \leq x < 0.1$ ) で示される窒化物半導体が挙げられる。障壁層は、アンドープでも、不純物をドーピングされていてもよいが、好ましくはしきい値電流密度を低下させるために、不純物(例えばSiなど)を $1 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ 以下、好ましくは $5 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ 以下含有されてなるものが好ましい。障壁層の膜厚としては、特に限定されないが、100Å以上、好ましくは100~200Å程度である。このような膜厚であると、素子が劣化しにくくなり寿命特性の向上の点で好ましい。

【0022】活性層の井戸層の積層数が2の場合、少なくとも井戸層が2層積層されていればよく、障壁層から始まり井戸層で終わっても、障壁層から始まり障壁層で終わっても、井戸層から始まり障壁層で終わっても、また井戸層から始まり井戸層で終わってもよい。好ましくは障壁層で始まり障壁層で終わると、しきい値電流密度を低下させ寿命特性を向上させるのに好ましい。また、活性層が井戸層の積層数が1である単一量子井戸構造の場合は、障壁層は井戸層を挟むように形成されるのが好ましい。単一量子井戸構造の場合、障壁層が形成されていると、しきい値電流密度の低下及び寿命特性の向上の点で好ましい。また、活性層が単一量子井戸構造の場合、障壁層を設けない素子構造とすることもできる。

10

20

30

40

50

【0023】本発明の窒化物半導体レーザ素子は、少なくとも、上記のように井戸層の全積層数と420nm以上の発振波長が得られるようにIn組成比の調整された活性層を有していればよく、その他の素子構造としては特に限定されないが、例えば具体的な一実施の形態としては、図5に示す素子構造のレーザ素子を挙げることができる。レーザ素子が、図5に示す素子構造と、上記の井戸層等の特定された活性層と組み合わせると、しきい値電流密度の低下及び寿命特性の向上の点で好ましい。しかし、本発明はこれに限定されない。

【0024】図5は、本発明の一実施の形態である窒化物半導体レーザ素子を示す模式的断面図である。図5には、サファイア等の異種基板上にELOG成長させた窒化物半導体基板1上に、n型不純物(例えばSi)をドーピングした $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 < x < 1$ ) よりなるn型コンタクト層2、Siドーピングの $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0.05 \leq x \leq 0.2$ ) よりなるクラック防止層3、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0.12 \leq x < 0.15$ ) を含んでなる多層膜のn型クラッド層4、アンドープのGa<sub>0.99</sub>Nからなるn型ガイド層5、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 \leq x < 1$ ) からなる量子井戸構造の活性層6、Mgドーピングの $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 < x \leq 1$ ) からなる少なくとも1層以上のp型電子閉じ込め層7、アンドープのGa<sub>0.99</sub>Nからなるp型ガイド層8、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 < x \leq 1$ ) を含んでなる多層膜のp型クラッド層9、MgドーピングのGa<sub>0.99</sub>Nからなるp型コンタクト層10からなるリッジ形状のストライプを有する窒化物半導体レーザ素子が示されている。また、p電極は、リッジ形状のストライプの最上層に形成され、n電極はn型コンタクト層上に形成される。以下に、基板や各層等について更に詳細に説明する。

【0025】(ELOG成長)まず、ELOG成長について以下に説明する。本発明において、用いることのできるELOG成長としては、窒化物半導体の縦方向の成長を少なくとも部分的に一時的止めて、横方向の成長を利用して転位を抑制することのできる成長方法であれば特に限定されない。

【0026】例えば具体例としては、窒化物半導体と異なる材料からなる異種基板上に、窒化物半導体が成長しないかまたは成長しにくい材料からなる保護膜を部分的に形成し、その上から窒化物半導体を成長させることにより、保護膜が形成されていない部分から窒化物半導体が成長し、成長を続けることにより保護膜上に向かって横方向に成長することにより厚膜の窒化物半導体(ELOG基板)が得られる成長方法が挙げられる。このような成長方法としては、例えば特願平10-275826号、特願平10-119377号、特願平10-146431号、特願平11-37826号、各明細書に記載の方法が挙げられる。

【0027】また、その他の具体例としては、保護膜を用いない方法であり、窒化物半導体と異なる材料からな

る異種基板上に成長させた窒化物半導体上に、凹凸を形成し、この上から再び窒化物半導体を成長させてなる窒化物半導体（ELOG基板）が得られる成長方法が挙げられる。また、保護膜を用いず、窒化物半導体の表面を部分的に改質して窒化物半導体の横方向の成長を意図的に行わせる方法が挙げられる。このような成長方法としては、例えば特願平11-378227号、特願平11-168079号、特願平11-142400号、各明細書に記載の方法が挙げられる。

【0028】また更に、上記のようなELOG成長等により得られた窒化物半導体を基板とし、この窒化物半導体上に、上記に示したような保護膜を用いて行う又は凹凸を形成する等のELOG成長を繰り返して転位を良好に低減される窒化物半導体を得る成長方法が挙げられる。このような成長方法としては、例えば特願平11-80288号明細書に記載の方法が挙げられる。

【0029】上記したELOG成長として好ましくは保護膜を用いなくて成長させる方法、及び窒化物半導体上にELOG成長させる方法である。このような方法で行うと転位の低減の点で好ましく、さらには転位の低減されたELOG基板上に素子構造を形成すると、しきい値電流密度の低減及び寿命特性の向上の点で好ましい。上記に挙げたELOG成長方法についての詳細は、上記列記した各号明細書の記載の通りであるが、好ましい一例を以下に示す。しかし、本発明はこれに限定されない。

【0030】以下に、本発明に用いることのできる好ましいELOG成長の一実施の形態を図4を用いて説明する。図4(a-1~a-4)は、窒化物半導体の成長方法の一実施の形態を段階的に示した模式図である。まず、図4(a-1)の第1の工程において、異種基板41上に第1の窒化物半導体42を成長させ、図4(a-2)の第2の工程において、第1の窒化物半導体42に凹凸を形成し、続いて図4(a-3)の第3の工程において、凹凸の形成された第1の窒化物半導体42上に、常圧以上の圧力条件下で、第2の窒化物半導体43を成長させる。

【0031】以下に上記各工程ごとに図4を用いて更に詳細に説明する。

（第1の工程）図4(a-1)は異種基板41上に、第1の窒化物半導体42を成長させる第1の工程を行った模式的断面図である。この第1の工程において、用いることのできる異種基板41としては、例えば、C面、R面、及びA面のいずれかを主面とするサファイア、スピネル（ $MgAl_2O_4$ ）のような絶縁性基板、SiC（6H、4H、3Cを含む）、ZnS、ZnO、GaAs、Si、及び窒化物半導体と格子整合する酸化物基板等、従来知られている窒化物半導体と異なる基板材料を用いることができる。好ましい異種基板としては、サファイア、スピネルが挙げられる。異種基板としてサファイアを用いる場合、サファイアの主面をどの面にするかによ

り、凹凸を形成した時の凸部上部と凹部側面の窒化物半導体の面方位が特定される傾向があり、その面方位によって、窒化物半導体の成長速度がやや異なることから、凹部側面に成長し易い面方位がくるように主面を選択してもよい。

【0032】また、第1の工程において、異種基板41上に第1の窒化物半導体42を成長させる前に、異種基板41上にバッファ層（図示されていない）を形成してもよい。バッファ層としては、AlN、GaN、AlGaIn、InGaN等が用いられる。バッファ層は、900℃以下300℃以上の温度で、膜厚0.5μm~100μmで成長される。このように異種基板41上にバッファ層を900℃以下の温度で形成すると、異種基板41と第1の窒化物半導体42との格子定数不正を緩和し、第1の窒化物半導体42の結晶欠陥が少なくなる傾向にある。

【0033】第1の工程において、異種基板41上に形成される第1の窒化物半導体42としては、アンドープ（不純物をドーピングしない状態、undope）のGaN、Si、Ge、及びS等のn型不純物をドーピングしたGaNを用いることができる。第1の窒化物半導体42は、高温、具体的には約900℃より高温~1100℃、好ましくは1050℃で異種基板41上に成長される。このような温度で成長させると、第1の窒化物半導体42は単結晶となる。第1の窒化物半導体42の膜厚は特に限定しないが、凹部内部での縦方向の成長を抑えて、横方向の成長が促進できるように、凹凸の形状を調整することが可能な膜厚であることが好ましく、少なくとも5000Å以上、好ましくは5μm以上、より好ましくは10μm以上の膜厚で形成する。

【0034】（第2の工程）次に、図4(a-2)は異種基板41上に第1の窒化物半導体42を成長させた後、第1の窒化物半導体42に部分的に第1の窒化物半導体42がわずかに残る程度の深さで凹凸を形成して、凹部側面に第1の窒化物半導体42を露出させてなる模式的断面図である。

【0035】第2の工程において、部分的に凹凸を形成するとは、少なくとも凹部側面に第1の窒化物半導体42が露出されるように、第1の窒化物半導体42の表面から異種基板41方向に窪みを形成してあればよく、第1の窒化物半導体42にいずれの形状で凹凸を設けてもよく、例えば、ランダムな窪み、ストライプ状、蒼盤目状、ドット状に形成できる。好ましい形状としては、ストライプ状であり、この形状とすると、異常成長が少なく、より平坦に埋まり好ましい。第1の窒化物半導体42に部分的に設けられた凹凸は、第1の窒化物半導体42の途中まで、又は異種基板に達する深さで形成され、好ましくは異種基板が露出する程度の深さが好ましい。凹部底部に異種基板が露出されていると、凹部底部からの成長が抑制されやすくなり、凹部開口部から厚膜に成



長する第2の窒化物半導体43の転位を低減し易くなり好ましい。

【0036】凹凸の形状は、凹部側面の長さや、凸部上部の幅と凹部底部の幅などは、特に限定されないが、少なくとも凹部内での縦方向の成長が抑制され、凹部開口部から厚膜に成長する第2の窒化物半導体43が凹部側面から横方向に成長したものとなるように調整されていることが好ましい。凹凸の形状をストライプ状とする場合、ストライプ幅（凸部上部の幅）を1~20 $\mu\text{m}$ 、好ましくは1~10 $\mu\text{m}$ であり、ストライプ間隔（凹部底部の幅）を3~20 $\mu\text{m}$ 、好ましくは10~19 $\mu\text{m}$ であるものを形成することができる。このようなストライプ形状を有していると、転位の低減と面状態を良好にする点で好ましい。凹部開口部から成長する第2の窒化物半導体43の部分を多くするには、凹部底部の幅を広くし、凸部上部の幅を狭くすることで可能となり、このようにすると転位の低減された部分を多くすることができる。凹部底部の幅を広くした場合には、凹部の深さを深めにすることが、凹部底部から成長する可能性のある縦方向の成長を防止するのに好ましい。

【0037】第2の工程で凹凸を設ける方法としては、第1の窒化物半導体42を一部分取り除くことができる方法であればいずれの方法でもよく、例えばエッチング、ダイシング等が挙げられる。エッチングにより、第1の窒化物半導体42に部分的（選択的）に凹凸を形成する場合は、フォトリソグラフィ技術における種々の形状のマスクパターンを用いて、ストライプ状、碁盤目状等のフォトマスクを作製し、レジストパターンを第1の窒化物半導体2に形成してエッチングすることにより形成できる。フォトマスクは、エッチングして凹凸を形成後に除去される。また、ダイシングで行う場合は、例えば、ストライプ状や碁盤目状に形成できる。

【0038】第2の工程において窒化物半導体をエッチングする方法には、ウェットエッチング、ドライエッチング等の方法があり、平滑な面を形成するには、好ましくはドライエッチングを用いる。ドライエッチングには、例えば反応性イオンエッチング（RIE）、反応性イオンビームエッチング（RIBE）、電子サイクロトロエッチング（ECR）、イオンビームエッチング等の装置があり、いずれもエッチングガスを適宜選択することにより、窒化物半導体をエッチングしてできる。例えば、本出願人が先に出願した特開平8-17803号公報記載の窒化物半導体の具体的なエッチング手段を用いることができる。また、エッチングによって凹凸を形成する場合、エッチング面（凹部側面）が、図4（a-2）に示すように異種基板に対して端面がほぼ垂直となる形状、又は順メサ形状や逆メサ形状でもよく、あるいは階段状になるように形成された形状等がある。好ましくは転位の低減や面状態の良好性などの点から、垂直、

逆メサ、順メサであり、より好ましくは垂直である。

【0039】（第3の工程）次に、図4（a-3）は、エッチングにより凹凸を有する第1の窒化物半導体42上に、常圧以上の加圧条件下で、第2の窒化物半導体43を成長させる第3の工程を行った模式的断面図である。第2の窒化物半導体43としては、前記第1の窒化物半導体42と同様のものを用いることができる。第2の窒化物半導体43の成長温度は、第1の窒化物半導体42を成長させる場合と同様であり、このような温度で成長させる第2の窒化物半導体43は単結晶となる。また、第2の窒化物半導体43を成長させる際に、不純物（例えばSi、Ge、Sn、Be、Zn、Mn、Cr、及びMg等）をドーピングして成長させる、または窒化物半導体の原料となるIII族とV族の成分のモル比（III/Vのモル比）を調整して成長させる等により、横方向の成長を縦方向の成長に比べて促進させ転位を低減させる点で好ましく、さらに第2の窒化物半導体43の表面の面状態を良好にする点で好ましい。

【0040】上記の常圧以上の加圧条件とは、常圧（意図的に圧力を加えない状態の圧力）から、装置などを調整し意図的に圧力を加えて加圧条件にした状態で反応を行うことである。具体的な圧力としては、常圧以上の圧力であれば特に限定されないが、好ましくは常圧（ほぼ1気圧）~2.5気圧であり、好ましい圧力としては、常圧~1.5気圧である。このような圧力の条件下で第2の窒化物半導体を成長させると、第2の窒化物半導体の表面の面状態を良好にする点で好ましい。

【0041】また、第3の工程において、凹部内部では凹部の側面から横方向に成長するものと、凹部底部から縦方向に成長するものがあると思われるが、成長し続ける過程で、凹部側面から成長した第2の窒化物半導体同士が接合し、凹部底部からの成長を抑制する。その結果、凹部開口部から成長した第2の窒化物半導体には転位がほとんど見られない。凹部底部からの縦方向の成長は、凹部側面からの横方向の成長に比べ、成長速度が遅いと思われる。また、凹部底部の表面が、サファイアなどの異種基板であると、凹部底部からの第2の窒化物半導体の成長が抑制され、凹部側面からの第2の窒化物半導体の成長が良好となり、転位の低減の点で好ましい。

【0042】一方、凸部上部から成長した第2の窒化物半導体部分には、凹部開口部から成長するものに比べてやや多めの転位が見られるが、凸部上部に縦方向に成長を始める窒化物半導体も、縦方向に成長する速度よりも、凹部開口部に向かって横方向に成長する傾向があり、凹凸を形成しないで縦方向に成長させた場合に比べれば転位が低減する。また、本発明の第2及び第3の工程を繰り返すことで、凸部上部の転位をなくすることができる。また、凸部上部と凹部内部から成長した第2の窒化物半導体は、成長の過程で接合し、図4（a-4）のようになる。

【0043】更に、第3の工程において、第2の窒化物半導体を成長させる際に、圧力を常圧以上の加圧条件に調整することにより、第2の窒化物半導体の表面が異常成長の少ない平坦な良好な面状態となる。

【0044】また、本発明において、第2及び第3の工程を繰り返す場合、図4(b-1)に示すように、第1の窒化物半導体に形成した凹部上部に凸部が、第1の窒化物半導体に形成した凸部上部に凹部が、それぞれ位置するように第2の窒化物半導体に部分的に凹凸を形成する。そして凹凸を形成された第2の窒化物半導体上に第3の窒化物半導体4を成長させる。第3の窒化物半導体4は、全体的に転位の少ない窒化物半導体となり好ましい。第3の窒化物半導体としては第2の窒化物半導体と同様のものを成長させる。また、第2及び第3の工程を繰り返す場合、第2の窒化物半導体の膜厚を、繰り返さない場合に比べて、やや薄く成長させ、第2の窒化物半導体に形成される凹部底部がサファイアなどの異種基板面となるように第2の窒化物半導体をエッチングすると、転位のより少ない面状態の良好な第3の窒化物半導体を得られ好ましい。

【0045】また、第2の窒化物半導体43は、この上に素子構造となる窒化物半導体を成長させるための基板となるが、素子構造を形成するには異種基板を予め除去してから行う場合と、異種基板等を残して行う場合がある。また、素子構造を形成した後で異種基板を除去する場合もある。異種基板等を除去する場合の第2の窒化物半導体5の膜厚は、50 $\mu$ m以上、好ましくは100 $\mu$ m以上、好ましくは500 $\mu$ m以下である。この範囲であると異種基板及び保護膜等を研磨除去しても、第2の窒化物半導体43が割れにくくハンドリングが容易となり好ましい。

【0046】また異種基板等を残して行う場合の第2の窒化物半導体43の膜厚は、特に限定されないが、100 $\mu$ m以下、好ましくは50 $\mu$ m以下、より好ましくは20 $\mu$ m以下である。この範囲であると異種基板と窒化物半導体の熱膨張係数差によるウエハの反りが防止でき、更に素子基板となる第2の窒化物半導体45の上に素子構造となる窒化物半導体を良好に成長させることができる。

【0047】本発明の窒化物半導体の成長方法において、第1の窒化物半導体42、及び第2の窒化物半導体43を成長させる方法としては、特に限定されないが、MOVPE（有機金属気相成長法）、HVPE（ハライド気相成長法）、MBE（分子線エピタキシー法）、MOCVD（有機金属化学気相成長法）等、窒化物半導体を成長させるのに知られている全ての方法を適用できる。好ましい成長方法としては、膜厚が100 $\mu$ m以下ではMOCVD法を用いると成長速度をコントロールし易い。また膜厚が100 $\mu$ m以下ではHVPEでは成長速度が速くてコントロールが難しい。

【0048】また本発明において、第2の窒化物半導体43上には、素子構造となる窒化物半導体を形成することができるので、明細書内において第2の窒化物半導体を素子基板又は窒化物半導体基板と言う場合がある。

【0049】また第1の工程における前記異種基板となる材料の主面をオフアングルさせた基板、さらにステップ状にオフアングルさせた基板を用いたほうが好ましい。オフアングルさせた基板を用いると、表面に3次元成長が見られず、ステップ成長があらわれ表面が平坦になり易い。更にステップ状にオフアングルされているサファイア基板のステップに沿う方向（段差方向）が、サファイアのA面に対して垂直に形成されていると、窒化物半導体のステップ面がレーザーの共振器方向と一致し、レーザー光が表面粗さにより乱反射されることが少なくなり好ましい。

【0050】更に好ましい異種基板としては、(0001)面[C面]を主面とするサファイア、(112-0)面[A面]を主面とするサファイア、又は(111)面を主面とするスピネルである。ここで異種基板が、(0001)面[C面]を主面とするサファイアであるとき、前記第1の窒化物半導体等に形成される凹凸のストライプ形状が、そのサファイアの(112-0)面[A面]に対して垂直なストライプ形状を有していること〔窒化物半導体の(101-0)[M面]に平行方向にストライプを形成すること〕が好ましく、また、オフアングルのオフ角 $\theta$ （図7に示す $\theta$ ）は0.1°～0.5°、好ましくは0.1°～0.2°が好ましい。また(112-0)面[A面]を主面とするサファイアであるとき、前記凹凸のストライプ形状はそのサファイアの(11-02)面[R面]に対して垂直なストライプ形状を有していることが好ましく、また(111)面を主面とするスピネルであるとき、前記凹凸のストライプ形状はそのスピネルの(110)面に対して垂直なストライプ形状を有していることが好ましい。ここでは、凹凸がストライプ形状の場合について記載したが、本発明においてサファイアのA面及びR面、スピネルの(110)面に窒化物半導体が横方向に成長し易いので、これらの面に第1の窒化物半導体の端面が形成されるように第1の窒化物半導体2に段差を形成するために保護膜の形成を考慮することが好ましい。

【0051】本発明に用いられる異種基板について図を用いて更に詳細に説明する。図6はサファイアの結晶構造を示すユニットセル図である。まず本発明の方法において、C面を主面とするサファイアを用い、凹凸はサファイアA面に対して垂直なストライプ形状とする場合について説明する。例えば、図8は主面側のサファイア基板の平面図である。この図はサファイアC面を主面とし、オリエンテーションフラット（オリフラ）面をA面としている。この図に示すように凹凸のストライプをA面に対して垂直方向で、互いに平行なストライプを形成



する。図8に示すように、サファイアC面上に窒化物半導体を選択成長させた場合、窒化物半導体は面内ではA面に対して平行な方向で成長しやすく、垂直な方向では成長しにくい傾向にある。従ってA面に対して垂直な方向でストライプを設けると、ストライプとストライプの間の窒化物半導体がつながって成長しやすくなり、図4に示したような結晶成長が容易に可能となると考えられるが詳細は定かではない。

【0052】次に、A面を主面とするサファイア基板を用いる場合、上記C面を主面とする場合と同様に、例えばオリフラ面をR面とすると、R面に対して垂直方向に、互いに平行なストライプを形成することにより、ストライプ幅方向に対して窒化物半導体が成長しやすい傾向にあるため、結晶欠陥の少ない窒化物半導体層を成長させることができる。

【0053】また次に、スピネル( $MgAl_2O_4$ )に対しても、窒化物半導体の成長は異方性があり、窒化物半導体の成長面を(111)面とし、オリフラ面を(110)面とすると、窒化物半導体は(110)面に対して平行方向に成長しやすい傾向がある。従って、(110)面に対して垂直方向にストライプを形成すると窒化物半導体層と隣接する窒化物半導体同士が保護膜の上部でつながって、結晶欠陥の少ない結晶を成長できる。なおスピネルは四方晶であるため特に図示していない。

【0054】また、以下に、オフアングルされたサファイア基板のステップに沿う方向が、サファイア基板のA面に対して垂直に形成されてなる場合について図7を用いて説明する。ステップ状にオフアングルしたサファイアなどの異種基板は、図7に示すようにほぼ水平なテラス部分Aと、段差部分Bとを有している。テラス部分Aの表面凹凸は少なく、ほぼ規則正しく形成されている。このようなオフ角 $\theta$ を有するステップ状部分は、基板全体にわたって連続して形成されていることが望ましいが、特に部分的に形成されていてもよい。なおオフ角 $\theta$ とは、図7に示すように、複数の段差の底部を結んだ直線と、最上層のステップの水平面との角度を示すものとする。また異種基板はオフ角が $0.1^\circ \sim 0.5^\circ$ 、好ましくは $0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ である。オフ角を上記範囲とすると、第1の窒化物半導体42表面は細かな筋状のモフォロジーとなり、エピタキシャル成長表面(第2の窒化物半導体43表面)は波状のモフォロジーとなり、この基板を用いて得られる窒化物半導体素子は平滑で、特性も長寿命、高効率、高出力、歩留まりの向上したものが得られる。

【0055】またさらに、上記のELOG成長等により得られた窒化物半導体基板上に更にELOG成長を行って得られる窒化物半導体を素子構造の基板とすると、転位の低減及び反りの低減などが良好となり、本発明の効果を得るのに好ましい。この好ましい一実施の形態としては、特願平11-80288号明細書に記載されてい

る内容が挙げられる。例えば好ましい一例として、上記の図4に示された工程により得られた第2の窒化物半導体43上に更に、例えばHVPEなどによって厚膜、例えば $80 \sim 500 \mu m$ の第3の窒化物半導体を成長させ、その後、異種基板などを除去して第3の窒化物半導体のみとし、この第3の窒化物半導体の異種基板除去面とは反対の面上に、HVPE等により第4の窒化物半導体を成長させる。第4の窒化物半導体の膜厚は、第3の窒化物半導体の膜厚と、第4の窒化物半導体の膜厚の合計が、例えば好ましくは $400 \sim 80 \mu m$ 程度の膜厚となるように調整される。このような第3及び第4の窒化物半導体からなる窒化物半導体上にELOG成長を繰り返すと転位が良好に低減された窒化物半導体基板を得ることができ、本発明の効果を得るのに好ましい。

【0056】上記のような、転位の少ない窒化物半導体を基板とし、この基板上に素子構造を形成すれば結晶性の良好な素子が得られ、しきい値電流密度の低減及び寿命特性の向上の点で好ましい。

【0057】上記のようなELOG成長により得られた窒化物半導体基板1上に、素子構造を成長させる。

(n型コンタクト層2) まず、n型コンタクト層2を窒化物半導体基板1上に成長させる。n型コンタクト層としては、n型不純物(好ましくはSi)をドーブされた $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x < 1$ )を成長させ、好ましくは $x$ が $0.01 \sim 0.05$ の $Al_xGa_{1-x}N$ を成長させる。n型コンタクト層がAlを含む3元混晶で形成されると、窒化物半導体基板1に微細なクラックが発生していても、微細なクラックの伝播を防止することができ、更に従来の問題点であった窒化物半導体基板1とn型コンタクト層との格子定数及び熱膨張係数の相違によるn型コンタクト層への微細なクラックの発生を防止することができ好ましい。n型不純物のドーブ量としては、 $1 \times 10^{18} / cm^3 \sim 5 \times 10^{18} / cm^3$ である。このn型コンタクト層2にn電極が形成される。n型コンタクト層2の膜厚としては、 $1 \sim 10 \mu m$ である。また、窒化物半導体基板1とn型コンタクト層2との間に、アンドーブの $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x < 1$ )を成長させてもよく、このアンドーブの層を成長させると結晶性が良好となり、寿命特性を向上させるのに好ましい。アンドーブn型コンタクト層の膜厚は、数 $\mu m$ である。

【0058】(クラック防止層3) 次に、クラック防止層3をn型コンタクト層2上に成長させる。クラック防止層3としては、Siドーブの $In_xGa_{1-x}N$  ( $0.05 \leq x \leq 0.2$ )を成長させ、好ましくは $x$ が $0.05 \sim 0.08$ の $In_xGa_{1-x}N$ を成長させる。このクラック防止層3は、省略することができるが、クラック防止層3をn型コンタクト層2上に形成すると、素子内のクラックの発生を防止するのに好ましい。Siのドーブ量としては、 $5 \times 10^{18} / cm^3$ である。また、クラック防止層3を成長させる際に、Inの混晶比を大きく(x

≥0.1)すると、クラック防止層3が、活性層6から発光しn型クラッド層4から漏れ出した光を吸収することができ、レーザ光のファーフールドパターンの乱れを防止することができ好ましい。クラック防止層の膜厚としては、結晶性を損なわない程度の厚みであり、例えば具体的には0.05~0.3μmである。

【0059】(n型クラッド層4)次に、n型クラッド層4をクラック防止層3上に成長させる。n型クラッド層4としては、 $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0.12 \leq x < 0.15$ )を含む窒化半導体を有する多層膜の層として形成される。多層膜とは、互いに組成が異なる窒化物半導体層を積層した多層膜構造を示し、例えば、 $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0.12 \leq x < 0.15$ )層と、この $Al_xGa_{1-x}N$ と組成の異なる窒化物半導体、例えばAlの混晶比の異なるもの、Inを含んでなる3元混晶のもの、又はGa<sub>0.9</sub>N等からなる層とを組み合わせ積層してなるものである。この中で好ましい組み合わせとしては、 $Al_xGa_{1-x}N$ とGa<sub>0.9</sub>Nとを積層してなる多層膜とすると、同一温度で結晶性の良い窒化物半導体層が積層でき好ましい。より好ましい多層膜としては、アンドープの $Al_xGa_{1-x}N$ とn型不純物(例えばSi)ドーパのGa<sub>0.9</sub>Nとを積層してなる組み合わせである。n型不純物は、 $Al_xGa_{1-x}N$ にドーパされてもよい。n型不純物のドーパ量は、 $4 \times 10^{18}/cm^3 \sim 5 \times 10^{18}/cm^3$ である。n型不純物がこの範囲でドーパされていると抵抗率を低くでき且つ結晶性を損なわない。このような多層膜は、単一の膜厚が100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、さらに好ましくは40オングストローム以下、好ましくは10オングストローム以上の膜厚の窒化物半導体層を積層してなる。単一の膜厚が100オングストローム以下であるとn型クラッド層が超格子構造となり、Alを含有しているにもかかわらず、クラックの発生を防止でき結晶性を良好にすることができる。また、n型クラッド層4の総膜厚としては、0.7~2μmである。またn型クラッド層の全体のAlの平均組成は、0.05~0.1である。Alの平均組成がこの範囲であると、クラックを発生させない程度の組成比で、且つ充分にレーザ導波路との屈折率の差を得るのに好ましい組成比である。

【0060】(n型ガイド層5)次に、n型ガイド層5をn型クラッド層4上に成長させる。n型ガイド層5としては、アンドープのGa<sub>0.9</sub>Nからなる窒化物半導体を成長させる。n型ガイド層5の膜厚としては、0.15~0.07μmであるとしきい値が低下し好ましい。n型ガイド層4をアンドープとすることで、レーザ導波路内の伝搬損失が減少し、しきい値が低くなり好ましい。

【0061】(活性層6)次に、活性層6をn型ガイド層5上に成長させる。活性層6としては、上記に記載の発振波長が420nm以上となるようにIn組成比が調整されたInGa<sub>0.9</sub>Nからなる井戸層を2層又は1層、積

層してなる量子井戸構造の活性層である。

【0062】(p型電子閉じ込め層6)次に、p型電子閉じ込め層7を活性層6上に成長させる。p型電子閉じ込め層7としては、Mgドーパの $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x \leq 1$ )からなる少なくとも1層以上を成長させてなるものである。好ましくはdが0.1~0.5のMgドーパの $Al_xGa_{1-x}N$ である。p型電子閉じ込め層7の膜厚は、10~1000オングストローム、好ましくは50~200オングストロームである。膜厚が上記範囲であると、活性層6内の電子を良好に閉じ込めることができ、且つバルク抵抗も低く抑えることができ好ましい。またp型電子閉じ込め層7のMgのドーパ量は、 $1 \times 10^{18}/cm^3 \sim 1 \times 10^{19}/cm^3$ である。ドーパ量がこの範囲であると、バルク抵抗を低下させることに加えて、後述のアンドープで成長させるp型ガイド層へMgが良好に拡散され、薄膜層であるp型ガイド層8にMgを $1 \times 10^{18}/cm^3 \sim 1 \times 10^{19}/cm^3$ の範囲で含有させることができる。またp型電子閉じ込め層7は、低温、例えば850~950℃程度の活性層を成長させる温度と同様の温度で成長させると活性層の分解を防止することができ好ましい。またp型電子閉じ込め層7は、低温成長の層と、高温、例えば活性層の成長温度より100℃程度の温度で成長させる層との2層から構成されていてもよい。このように、2層で構成されていると、低温成長の層が活性層の分解を防止し、高温成長の層がバルク抵抗を低下させるので、全体的に良好となる。またp型電子閉じ込め層7が2層から構成される場合の各層の膜厚は、特に限定されないが、低温成長層は10~50オングストローム、高温成長層は50~150オングストロームが好ましい。

【0063】(p型ガイド層8)次に、p型ガイド層8をp型電子閉じ込め層7上に成長させる。p型ガイド層8としては、アンドープのGa<sub>0.9</sub>Nからなる窒化物半導体層として成長させてなるものである。膜厚は0.15~0.07μmであり、この範囲であるとしきい値が低くなり好ましい。また上記したように、p型ガイド層はアンドープ層として成長させるが、p型電子閉じ込め層7にドーパされているMgが拡散して、 $1 \times 10^{18}/cm^3 \sim 1 \times 10^{19}/cm^3$ の範囲でMgが含有される。

【0064】(p型クラッド層9)次に、p型クラッド層9をp型ガイド層8に成長させる。p型クラッド層としては、 $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x \leq 1$ )を含んでなる窒化物半導体層、好ましくは $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0.05 \leq x \leq 0.15$ )を含んでなる窒化物半導体層を有する多層膜の層として形成される。多層膜とは、互いに組成が異なる窒化物半導体層を積層した多層膜構造であり、例えば、 $Al_xGa_{1-x}N$ 層と、 $Al_xGa_{1-x}N$ と組成の異なる窒化物半導体、例えばAlの混晶比の異なるもの、Inを含んでなる3元混晶のもの、又はGa<sub>0.9</sub>N等からなる層とを組み合わせ積層してなるものである。この中

で好ましい組み合わせとしては、 $Al_rGa_{1-r}N$ と $GaN$ とを積層してなる多層膜とすると、同一温度で結晶性の良い窒化物半導体層が積層でき好ましい。より好ましい多層膜としては、アンドープの $Al_rGa_{1-r}N$ と $p$ 型不純物（例えば $Mg$ ）ドープの $GaN$ とを積層してなる組み合わせである。 $p$ 型不純物は、 $Al_rGa_{1-r}N$ にドープされてもよい。 $p$ 型不純物のドープ量は、 $1 \times 10^{17}/cm^3 \sim 1 \times 10^{19}/cm^3$ である。 $p$ 型不純物がこの範囲でドープされていると結晶性を損なわない程度のドープ量で且つバルク抵抗が低くなり好ましい。このような多層膜は、単一層の膜厚が100オングストローム以下、好ましくは70オングストローム以下、さらに好ましくは40オングストローム以下、好ましくは10オングストローム以上の膜厚の窒化物半導体層を積層してなる。単一の膜厚が100オングストローム以下であると $n$ 型クラッド層が超格子構造となり、 $Al$ を含有しているにもかかわらず、クラックの発生を防止でき結晶性を良好にすることができる。 $p$ 型クラッド層9の総膜厚としては、 $0.4 \sim 0.5 \mu m$ であり、この範囲であると順方向電圧( $V_f$ )を低減するために好ましい。また $p$ 型クラッド層の全体の $Al$ の平均組成は、 $0.05 \sim 0.1$ である。この値は、クラックの発生を抑制し且つレーザ導波路との屈折率差を得るのに好ましい。

【0065】( $p$ 型コンタクト層10)次に、 $p$ 型コンタクト層10を $p$ 型クラッド層9上に成長させる。 $p$ 型コンタクト層としては、 $Mg$ ドープの $GaN$ からなる窒化物半導体層を成長させてなるものである。膜厚は10~200オングストロームである。 $Mg$ のドープ量は $1 \times 10^{17}/cm^3 \sim 1 \times 10^{19}/cm^3$ である。このよう膜厚と $Mg$ のドープ量を調整することにより、 $p$ 型コンタクト層のキャリア濃度が上昇し、 $p$ 電極とのオーミックがとりやすくなる。

【0066】本発明の素子において、リッジ形状のストライプは、 $p$ 型コンタクト層からエッチングされて $p$ 型コンタクト層よりも下側(基板側)までエッチングされることにより形成される。例えば図5に示すような $p$ 型コンタクト層10から $p$ 型クラッド層9の途中までエッチングしてなるストライプ、又は $p$ 型コンタクト層10から $n$ 型コンタクト層2までエッチングしてなるストライプなどが挙げられる。

【0067】エッチングして形成されたリッジ形状のストライプの側面やその側面に連続した窒化物半導体層の平面に、例えば図5に示すように、レーザ導波路領域の屈折率より小さい値を有する絶縁膜が形成されている。ストライプの側面等に形成される絶縁膜としては、例えば、屈折率が約1.6~2.3付近の値を有する、 $Si$ 、 $V$ 、 $Zr$ 、 $Nb$ 、 $Hf$ 、 $Ta$ よりなる群から選択された少なくとも一種の元素を含む酸化物や、 $BN$ 、 $AlN$ 等が挙げられ、好ましくは、 $Zr$ 及び $Hf$ の酸化物のいずれか1種以上の元素や、 $BN$ である。さらにこの絶

縁膜を介してストライプの最上層にある $p$ 型コンタクト層10の表面に $p$ 電極が形成される。エッチングして形成されるリッジ形状のストライプの幅としては、 $0.5 \sim 4 \mu m$ 、好ましくは $1 \sim 3 \mu m$ である。ストライプの幅がこの範囲であると、水平横モードが単一モードになり易く好ましい。また、エッチングが $p$ 型クラッド層9とレーザ導波路領域との界面よりも基板側にかけてなされていると、アスペクト比を1に近づけるのに好ましい。以上のように、リッジ形状のストライプのエッチング量や、ストライプ幅、さらにストライプの側面の絶縁膜の屈折率などを特定すると、単一モードのレーザ光が得られ、さらにアスペクト比を円形に近づけられ、レーザビームやレンズ設計が容易となり好ましい。また、リッジ形状のストライプを形成する際、素子構造を形成するための基板が $ELOG$ 基板である場合、 $ELOG$ 成長が保護膜を用いて行う場合は保護膜の上方部に、 $ELOG$ 成長が凹凸を設けて行う場合は凹部上方部に、リッジ形状のストライプが形成されることが素子の信頼性の向上の点で好ましい。また、保護膜の中心部、凹部の中心部のそれぞれの上部を避けることが信頼性の点で好ましい。また本発明の素子において、 $p$ 電極や $n$ 電極等は従来公知の種々のものを適宜選択して用いることができる。

【0068】以上のような不純物濃度、膜厚、組成などを調整された各素子構造、幅の狭いリッジ形状のストライプなどを組み合わせると、しきい値電流密度の低下と寿命特性の向上の点で好ましい。

【0069】

【実施例】以下に本発明の一実施の形態である実施例を示す。しかし本発明はこれに限定されない。また、本実施例はMOVPE(有機金属気相成長法)について示すものであるが、本発明の方法は、MOVPE法に限るものではなく、例えばHVPE(ハライド気相成長法)、MBE(分子線気相成長法)等、窒化物半導体を成長させるのに知られている全ての方法を適用できる。また、発明の詳細な説明に記載したように、 $In$ 組成比の理論値の計算式の値と、量子井戸構造をとる量子単位の形成による短波長へのシフトなどによる実際の発振波長とは異なるために、実施例の活性層の $In$ 組成比は近似的な値である。

【0070】[実施例1]実施例1として、図5に示される本発明の一実施の形態である窒化物半導体レーザ素子を製造する。

【0071】異種基板41として、図7に示すようにステップ状にオフアングルされた $C$ 面を主面とし、オフアングル角 $\theta = 0.15^\circ$ 、ステップ段差およそ20オングストローム、テラス幅 $W$ およそ800オングストロームであり、オリフラ面を $A$ 面とし、ステップが $A$ 面に垂直であるサファイア基板を用意する。このサファイア基板を反応容器内にセットし、温度を $510^\circ C$ にして、キ

キャリアガスに水素、原料ガスにアンモニアとTMG（トリメチルガリウム）を用い、サファイア基板にGa<sub>0.1</sub>Nよりなる低温成長のバッファ層を200オングストロームの膜厚で成長させる。バッファ層成長後、TMGのみ止めて、温度を1050℃まで上昇させ、1050℃になったら、原料ガスにTMG、アンモニアを用い、アンドープのGa<sub>0.1</sub>Nからなる第1の窒化物半導体層を2μmの膜厚で成長させる。次に、第1の窒化物半導体層を積層したウェーハ上にストライプ状のフォトリソマスクを形成し、スパッタ装置によりストライプ幅（凸部の上部になる部分）5μm、ストライプ間隔（凹部底部となる部分）10μmにパターニングされたSiO<sub>2</sub>膜を形成し、続いて、RIE装置によりSiO<sub>2</sub>膜の形成されていない部分の第1の窒化物半導体層をサファイアが露出するまでエッチングして凹凸を形成することにより、凹部側面に第1の窒化物半導体層を露出させる。凹凸を形成後に、凸部上部のSiO<sub>2</sub>膜を除去する。なおストライプ方向は、図8に示すように、オリフラ面に対して垂直な方向で形成する。次に、反応容器にセットし、常圧で、原料ガスにTMG、アンモニアを用い、アンドープのGa<sub>0.1</sub>Nよりなる第2の窒化物半導体層を15μmの膜厚で成長させ窒化物半導体基板1とする。得られた窒化物半導体層を窒化物半導体基板1として以下の素子構造を積層成長させる。

【0072】（アンドープn型コンタクト層）【図5には図示されていない】

窒化物半導体基板1上に、1050℃で原料ガスにTMA（トリメチルアルミニウム）、TMG、アンモニアガスを用いアンドープのAl<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nよりなるn型コンタクト層を1μmの膜厚で成長させる。

（n型コンタクト層2）次に、同様の温度で、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアガスを用い、不純物ガスにシランガス（SiH<sub>4</sub>）を用い、Siを $3 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたAl<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nよりなるn型コンタクト層2を3μmの膜厚で成長させる。成長されたn型コンタクト層2には、微細なクラックが発生しておらず、微細なクラックの発生が良好に防止されている。また、窒化物半導体基板1に微細なクラックが生じていても、n型コンタクト層2を成長させることで微細なクラックの伝播を防止でき結晶性の良好な素子構造を成長させることができる。結晶性の改善は、n型コンタクト層2のみの場合より、上記のようにアンドープn型コンタクト層を成長させることによりより良好となる。

【0073】（クラック防止層3）次に、温度を800℃にして、原料ガスにTMG、TM（トリメチルインジウム）及びアンモニアを用い、不純物ガスにシランガスを用い、Siを $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたIn<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nよりなるクラック防止層3を0.15μmの膜厚で成長させる。

【0074】（n型クラッド層4）次に、温度を105

0℃にして、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアを用い、アンドープのAl<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>NよりなるA層を25オングストロームの膜厚で成長させ、続いて、TMAを止め、不純物ガスとしてシランガスを用い、Siを $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたGa<sub>0.1</sub>NよりなるB層を25オングストロームの膜厚で成長させる。そして、この操作をそれぞれ160回繰り返してA層とB層の積層し、総膜厚8000オングストロームの多層膜（超格子構造）よりなるn型クラッド層4を成長させる。

【0075】（n型ガイド層5）次に、同様の温度で、原料ガスにTMG及びアンモニアを用い、アンドープのGa<sub>0.1</sub>Nよりなるn型ガイド層を0.075μmの膜厚で成長させる。

【0076】（活性層6）次に、温度を800℃にして、原料ガスにTM（トリメチルインジウム）、TMG及びアンモニアを用い、不純物ガスとしてシランガスを用い、Siを $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたIn<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nよりなる障壁層を120オングストロームの膜厚で成長させる。続いて、シランガスを止め、In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nよりなる井戸層を20オングストロームの膜厚で成長させる。この操作を1回繰り返し、最後に障壁層を積層した総膜厚400オングストロームの多重量子井戸構造（MQW）の活性層6を成長させる。

【0077】（p型電子閉じ込め層7）次に、同様の温度で、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアを用い、不純物ガスとしてCp<sub>2</sub>Mg（シクロペンタジエニルマグネシウム）を用い、Mgを $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドープしたAl<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nよりなるp型電子閉じ込め層7を100オングストロームの膜厚で成長させる。

【0078】（p型ガイド層8）次に、温度を1050℃にして、原料ガスにTMG及びアンモニアを用い、アンドープのGa<sub>0.1</sub>Nよりなるp型ガイド層8を0.075μmの膜厚で成長させる。このp型ガイド層8は、アンドープとして成長させるが、p型電子閉じ込め層7からのMgの拡散により、Mg濃度が $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ となりp型を示す。

【0079】（p型クラッド層9）次に、同様の温度で、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアを用い、アンドープのAl<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>NよりなるA層を25オングストロームの膜厚で成長させ、続いて、TMAを止め、不純物ガスとしてCp<sub>2</sub>Mgを用い、Mgを $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたGa<sub>0.1</sub>NよりなるB層を25オングストロームの膜厚で成長させる。そして、この操作をそれぞれ100回繰り返してA層とB層の積層し、総膜厚5000オングストロームの多層膜（超格子構造）よりなるp型クラッド層9を成長させる。

【0080】（p型コンタクト層10）次に、同様の温度で、原料ガスにTMG及びアンモニアを用い、不純物ガスとしてCp<sub>2</sub>Mgを用い、Mgを $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドープしたGa<sub>0.1</sub>Nよりなるp型コンタクト層10を15

0 オングストロームの膜厚で成長させる。

【0081】反応終了後、反応容器内において、ウェハを窒素雰囲気中、700℃でアニーリングを行い、p型層を更に低抵抗化する。アニーリング後、ウェハを反応容器から取り出し、最上層のp側コンタクト層の表面にSiO<sub>2</sub>よりなる保護膜を形成して、RIE（反応性イオンエッチング）を用いSiCl<sub>4</sub>ガスによりエッチングし、図9に示すように、n電極を形成すべきn側コンタクト層2の表面を露出させる。次に図9（a）に示すように、最上層のp側コンタクト層10のほぼ全面に、PVD装置により、Si酸化物（主として、SiO<sub>2</sub>）よりなる第1の保護膜61を0.5μmの膜厚で形成した後、第1の保護膜61の上に所定の形状のマスクをかけ、フォトリソよりなる第3の保護膜63を、ストライプ幅1.8μm、厚さ1μmで形成する。次に、図9（b）に示すように第3の保護膜63形成後、RIE（反応性イオンエッチング）装置により、CF<sub>4</sub>ガスを用い、第3の保護膜63をマスクとして、前記第1の保護膜をエッチングして、ストライプ状とする。その後エッチング液で処理してフォトリソのみを除去することにより、図9（c）に示すようにp側コンタクト層10の上にストライプ幅1.8μmの第1の保護膜61が形成できる。

【0082】さらに、図9（d）に示すように、ストライプ状の第1の保護膜61形成後、再度RIEによりSiCl<sub>4</sub>ガスを用いて、p側コンタクト層10、およびp側クラッド層9をエッチングして、ストライプ幅1.8μmのリッジ形状のストライプを形成する。但し、リッジ形状のストライプは、図5に示すように、ELOG成長を行う際に形成した凹部の上部で且つ凹部の中心部分を避けるように形成される。リッジストライプ形成後、ウェハをPVD装置に移送し、図9（e）に示すように、Zr酸化物（主としてZrO<sub>2</sub>）よりなる第2の保護膜62を、第1の保護膜61の上と、エッチングにより露出されたp側クラッド層9の上に0.5μmの膜厚で連続して形成する。このようにZr酸化物を形成すると、p-n面の絶縁をとるためと、検モードの安定を図ることができ好ましい。次に、ウェハをフッ酸に浸漬し、図9（f）に示すように、第1の保護膜61をリフトオフ法により除去する。

【0083】次に図9（g）に示すように、p側コンタクト層10の上の第1の保護膜61が除去されて露出したそのp側コンタクト層の表面にNi/Auよりなるp電極20を形成する。但しp電極20は100μmのストライプ幅として、この図に示すように、第2の保護膜62の上に渡って形成する。第2の保護膜62形成後、図5に示されるように露出させたn側コンタクト層2の表面にはTi/Alよりなるn電極21をストライプと平行な方向で形成する。

【0084】以上のようにして、n電極とp電極とを形

成したウェーハのサファイア基板を研磨して70μmとした後、ストライプ状の電極に垂直な方向で、基板側からバー状に劈開し、劈開面（11-00面、六角柱状の結晶の側面に相当する面=M面）に共振器を作製する。共振器面にSiO<sub>2</sub>とTiO<sub>2</sub>よりなる誘電体多層膜を形成し、最後にp電極に平行な方向で、バーを切断して図5に示すようなレーザ素子とする。なお共振器長は300~500μmとすることが望ましい。得られたレーザ素子をヒートシンクに設置し、それぞれの電極をワイヤーボンディングして、室温でレーザ発振を試みた。その結果、得られたレーザ素子は、50℃、しきい値電流密度5kA/cm<sup>2</sup>、出力5mW、発振波長420nmの連続発振が確認され、300時間以上の寿命を示す。

【0085】【実施例2】実施例1において、活性層6を下記のように、発振波長を430nmとなるようにIn組成比を調整し、井戸層の積層数を調整する他は同様にして窒化物半導体レーザ素子を作製する。

（活性層6）次に、温度を800℃にして、原料ガスにTMI、TMG及びアンモニアを用い、不純物ガスとしてシランガスを用い、Siを5×10<sup>18</sup>/cm<sup>3</sup>ドープしたIn<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nよりなる障壁層を160オングストロームの膜厚で成長させる。続いて、シランガスを止め、In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nよりなる井戸層を20オングストロームの膜厚で成長させる。続いて、最後に上記と同様の障壁層を積層した総膜厚340オングストロームの単一量子井戸構造（SQW）の活性層6を成長させる。得られたレーザ素子は、実施例1と同様の条件でレーザ発振させたところ、実施例1とはほぼ同等に、しきい値電流密度が低く良好な寿命特性を有する。

【0086】【実施例3】実施例2において、活性層の井戸層のIn組成比を、発振波長が450nmとなるように調整する他は同様にしてレーザ素子を作製する。得られるレーザ素子は、実施例2と同様の条件でレーザ発振させたところ、実施例2とはほぼ同等の良好な結果である。

【0087】

【発明の効果】本発明は、発振波長が420nm以上となるような高In組成比とし、さらに井戸層の全積層数を2以下とすることにより、しきい値電流密度を低下させ、寿命特性の向上が可能な窒化物半導体レーザ素子を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は、本発明のレーザ素子の活性層の井戸層の積層数と、しきい値電流密度の関係を示すグラフである。

【図2】図2は、InGa<sub>1-x</sub>N井戸層のバンドギャップエネルギー（E<sub>g</sub>）と、量子準位の形成による発振波長のエネルギー（E<sub>λ</sub>）とを示した模式的断面図である。

【図3】図3は、従来のレーザ素子の活性層の井戸層の積層数と、しきい値電流密度の関係を示すグラフであ

る。

【図4】図4は、本発明で用いることのできるELOG成長の一実施の形態の各工程の構造を示す模式的断面図である。

【図5】図5は、本発明の一実施の形態である窒化物半導体レーザ素子を示す模式的断面図である。

【図6】図6は、サファイアの面方位を示すユニットセル図である。

【図7】図7は、オフアングルした異種基板の部分的な形状を示す模式的断面図である。

【図8】図8は、凹凸のストライプ方向を説明するための基板主面側の平面図である。

【図9】図9は、リッジ形状のストライプを形成する一\*

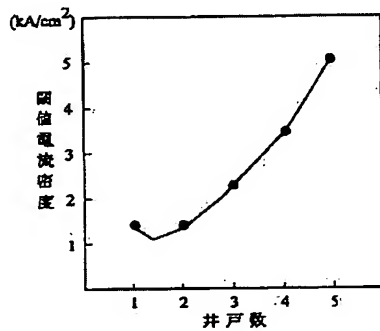
\*実施の形態である方法の各工程におけるウェハの部分的な構造を示す模式的断面図である。

【符号の説明】

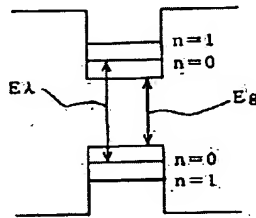
- 1・・・窒化物半導体基板
- 2・・・n型コンタクト層
- 3・・・クラック防止層
- 4・・・n型クラッド層
- 5・・・n型ガイド層
- 6・・・活性層
- 7・・・p型電子閉じ込め層
- 8・・・p型ガイド層
- 9・・・p型クラッド層
- 10・・・p型コンタクト層

【図1】

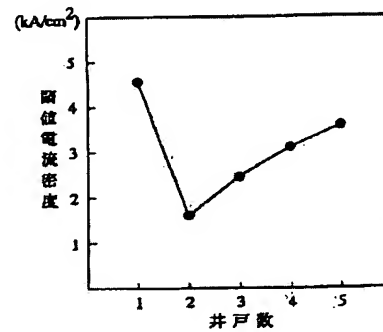
(a)



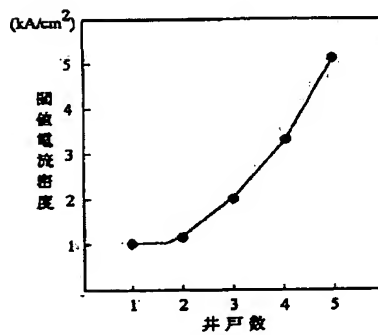
【図2】



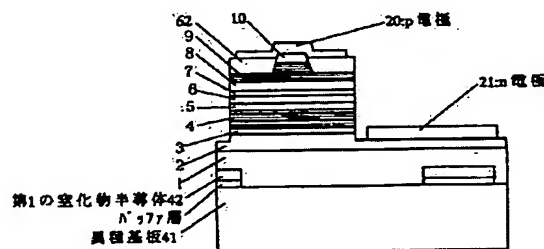
【図3】



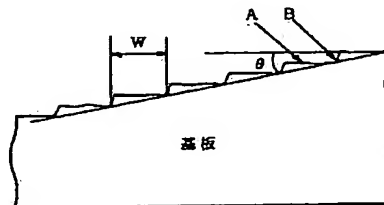
(b)



【図5】

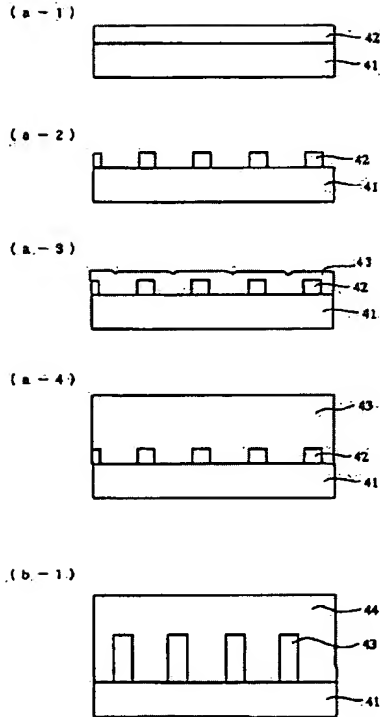


【図7】

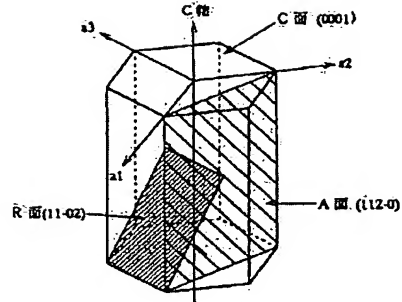




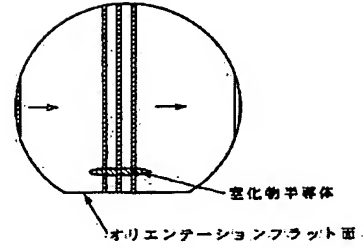
【図4】



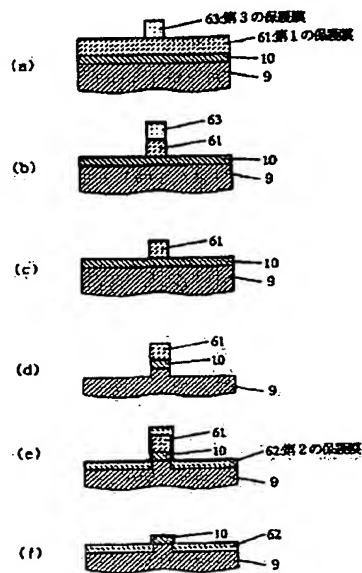
【図6】



【図8】



【図9】



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**